



TITLE:

可能世界、不確かさ、結合動的認識ネットワーク系(認知・行動の基底としての力学と論理,研究会報告)

AUTHOR(S):

池上, 高志

CITATION:

池上, 高志. 可能世界、不確かさ、結合動的認識ネットワーク系(認知・行動の基底としての力学と論理,研究会報告). 物性研究 1998, 71(2): 141-145

ISSUE DATE:

1998-11-20

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/96442>

RIGHT:

可能世界、不確かさ、結合動的認識ネットワーク系

池上高志 *

東京大学大学院、総合文化研究科、広域システム科学

1 はじめに

生命と非生命の違いは何か、を考えた時、「「間違っただけ」行為」という見方が妥当となるようなシステムを構築することで考えが進むのではないかと考えていた。この考えは今でも基本的には変わっていないが、それを形式化するのは非常に困難であると思われる。その理由のひとつは、この研究会でも多く議論されたように、間違っただけという見方が可能になるという問題は、主体の問題であり、また内部観測といわれる問題であるために、計算機に載せられるような客観的な枠組が与えにくいことにある。

身体性とは、そのような問いを可能にする相互作用のあり方、であると私は考えている。どんな相互作用の仕方でも可能であるならば、そこには身体性の問題は発生しないだろう。しかし身体性を単に受身的な物理的制約という意味でここでとらえているわけではない。むしろ身体性とは、「間違える」という見方の発生させる能動的なインターフェイスでなくてはならない。インターフェイスがあつてはじめて、意思決定や記憶、認識、から倫理にいたる見方までをわれわれが問題とすることが可能となると思われる。そのようなインターフェイス論（それを *interfaceology* と呼ぼう）を発展させるための第1歩として、ここではゲームを介して相互作用する動的認識ネットワークをとりあげる。

2 ゲームと動的認識ネットワーク

考えるゲームは繰り返し囚人のジレンマゲームである。このゲームには基本的に2つの手（協調と裏切り）が用意されている。2人でこのゲームを行なう場合、したがって手の組み合わせは4通りある。その組み合わせに対して得点が割り振ってある。

(協調、協調) = (1, 1)

(協調、裏切) = (0, p)

(裏切、協調) = (p, 0)

(裏切、裏切) = (q, q)

ここで、 $2 > p > 1$ と $1 > q > 0$ という条件が満たされているために、このゲームは繰り返さない場合、裏切った方が得である。それはゲーム理論が解として認めるものでもある。それでは繰り返してゲームを行なった場合はどうか。このときは、裏切り以外の解も現れると信じられていたが、どういう形で実際に協調的な振るまいがもたらされるかはあまり知られていなかった。そこで Axelrod が 1980 年頃にコンピューターのプログラムどうしの囚人のジレンマゲーム大会を、世界中にプログラムの投稿を呼びかけるという形で行なったことがある (Axelrod, 1984)。そのときに TIT FOR TAT という戦略がこのゲームで協調をもたすことが知れ渡った。TIT FOR TAT は、前回の相手の手を繰り返すだけの単純な戦略であるがその単純さ、寛容さ、厳しさ、ゆえに協調をもたすことが分かっている。

さて、このゲームを人間が行なった場合はどうか。多くの場合、安定して裏切りや協調を用いる人は少なく、ときどき裏切ったりしてみたりといろいろ振舞うことが、予想される。つまり相手はもしかすると裏切ってくるのではないかと、自分に対する信用を消失したのではにかという様々な疑問が湧き起こって、内部的に戦略が揺らいでしまうからである。

そのような内部的揺らぎを扱うために、プレイヤーの中にある力学系を持たせることを考えたい。そのひとつの例として動的認識ネットワークをここでは用いることにする。動的認識ネットワークは Pollock(1991) や Elman(1995) らによって独立に提案された再帰的ニューラルネットの1種である。このネットワークを用いて、相手のモデルをゲームの過去の対戦経歴から構成し、それをもとに相手の将来の動きを予測して、自分の次に打つべき手を決定するシステムを構築するというのが、われわれのモデル (Taiji and Ikegami, 1998)(Ikegami and Taiji 1998) である。

モデルのシミュレーションでは、お互いにお互いのモデルを作り合うために自分のつくる相手のモデ

*ikeg@sacral.c.u-tokyo.ac.jp

ルの記述には、相手のつくる自分のモデルの記述がふくまれ、その中に自分の記述が、。。という形で自己言及的な様相が自己相似的に組み込まれてしまう。そのことが内部的な揺らぎを拡大してゲーム理論の解析にはみられないゲームの進行状況をみていこうというのがこの研究のひとつの主眼である。しかしここでの議論はもうひとつの方の主眼すなわち、可能世界的様相をこのシミュレーションの中に見ていくということにある (Ikegami and Taiji, 1998)。

可能世界とは、現実の世界以外に可能だと考えられる世界の全体のことである。そのあるべき他の世界と現実の世界との関係性から、その世界の住人の信念体系の構造を研究することができる (Hughes and Cresswell, 1968)。この可能世界を計算機の中でシミュレートする可能性について考えてみたい。もちろん可能世界の定義から、それを閉じた形で記述することは矛盾しているのであるが、それでも、プラグマティックな問題という観点から可能世界に濃淡をつけることができる。例えば、今から10分後にニューヨークにいるような可能世界は、10分後も今と同じところにいるという世界から遠く、10分後に指の爪を切るという世界はより近い、といったことである。しかし、1年後の同じ日にニューヨークにいることは十分可能である。どういう行為あるいは意思決定が複雑な可能世界を生み出すか。とくに、自分の意思決定に関する可能世界を描くことで、どういう状況におけるどのような意思決定が、将来において複雑な可能世界を構成しうるか、そういうことを考えていこうと思う。その結果、後づけ的に、自分のいまいる状況に対する意思決定がどのくらい不安定となり、その結果増幅されてしまう意思決定の揺らぎを論じる。

そういった形で可能世界における差異を生み出す装置として身体性を位置づけ、そこから自律性というものを再定義していこうというのが、ここでの研究のひとつの目的である。。その最初の試みとして以下のようなシミュレーションを試みた。

3 シミュレーション

3.1 Coupled Dynamical Recognizers

動的認識ネットワークでは、アウトプットに直接奇与しないニューロンが再帰的にニューロン間の結合の強さを変化させるために外からみると同じような状況に対してコンテキストを構成することができ

る。べつな言い方をすると、異なる入力に対しそれぞれ異なる関数を適応するシステムと考えることができる。

このネットワークに関しては近年多くのことが調べられているが、このシステムを使うことのありがたみは、先のコンテキストを基にしたネットワークの構造表現にあるといえるだろう。この構造は、全入力状態に対するネットワークの全出力のパターンで表される。例えば、出力層のニューロンが N 個あれば、それは N 次元の超立方体の中の幾何学模様で表される。この超立方体のことを、コンテキスト空間と呼ぶことにする。ここでの用い方を例にとると、相手のプレイヤーがしたがっている戦略の構造を動的認識ネットワークで表ことになるが、このときコンテキスト空間はどういう模様が生まれるか。相手がある有限オートマトンに単純にしたがって手を決定し、その相手のオートマトンをその相手とゲームすることで決定できるかという問題を考えてみる。この問題は、いろいろな方法によって学習可能であろうがこの動的認識ネットワークを使った学習では、コンテキスト空間の幾何学パターンは対応する有限オートマトンのノードに相当するところにクラスターしたパターンとなる。逆にあいてが学習できなかった場合や、有限オートマトンで表せない戦略を用いた場合には、離散的なクラスターを持たない、したがって有限オートマトンに対応させることのできない、無限ノードのオートマトンが表現できる。

今相手のモデルはその過去の振るまいをもっともうまく真似できたモデルをもって相手のモデルとして採用し、そのモデルをもとに、自分がどのように将来ふるまったら相手がどのように振舞うかを予測し、自分の将来の振るまいに対し最良の結果が引き出せるような手を決定する。このときに、先に議論した決定の不確定性の問題が持ち上がる。ここでの研究はこの不確定性をきちんと扱うことにあるので、それをより明示的に行なうために、ある予測の精度を持つモデル群は区別がつかないと考えことにし、さらにネットワークの重みを -1 と 1 だけにして有限個のモデル空間を調べることにする。こうすることにより、多くの状況で構成される相手のモデルとして複数のモデルが縮退する。このときもしモデルが縮退しても、どのモデルを採用するかによって将来自分の出すべき手が違わなければ問題は無い。問題は、どのモデルを採用するかによって将来の自分の出すべき手が違う場合である。通常このような場合には、確率的にどちらかを選ぶのだが、ここでは世



図 1: ここでは、 $p = 1.7, q = 0.4$ の場合の可能世界分岐構造を示す。図中矢印は協調的なアトラクターに至る分岐を表す。上向きにゲームが進行する。

界線を分岐させることをする。世界線とはここでは、CとDの時系列である。ある世界線上でモデルが縮退しかつ将来の手の予測が異なるたびに世界線は分岐し、時間方向に沿って枝分かれするゲームの発展の図を得ることができる。これが、このシミュレーションで得る「可能世界」像である。可能世界の形態は、ゲームの利得の値などによっていろいろと変化する。それはそのままゲームの持つ「操作的な」複雑さを表していると考えている。それを以下で見ていくことにする。

4 相手のモデルの変遷

まず図1にみるのが、Axelrodの行なったゲームに近い状況で描かれた可能世界の構図である。ランダムに与えた初期の対戦パターンをもとに相手のモデルが作られ、それをもとに手を出す。ここでやった計算では、多くの世界線は、相互裏切りの世界をアトラクターとしてもっている。しかしモデルが予測のある精度内で区別できないとすることで、この例にみるように近傍の世界線が、異なるアトラクターを持つようになる。このアトラクターは相互協調のアトラクターである。相互協調と相互裏切りに至る世界線上でのモデルの変遷をコンテキスト空間の上の模様として表現してみよう。図2が、相互協調に至る場合、図3は相互裏切りに至る場合である。ここでの例では相互協調が獲得されるのは、お互いにTIT

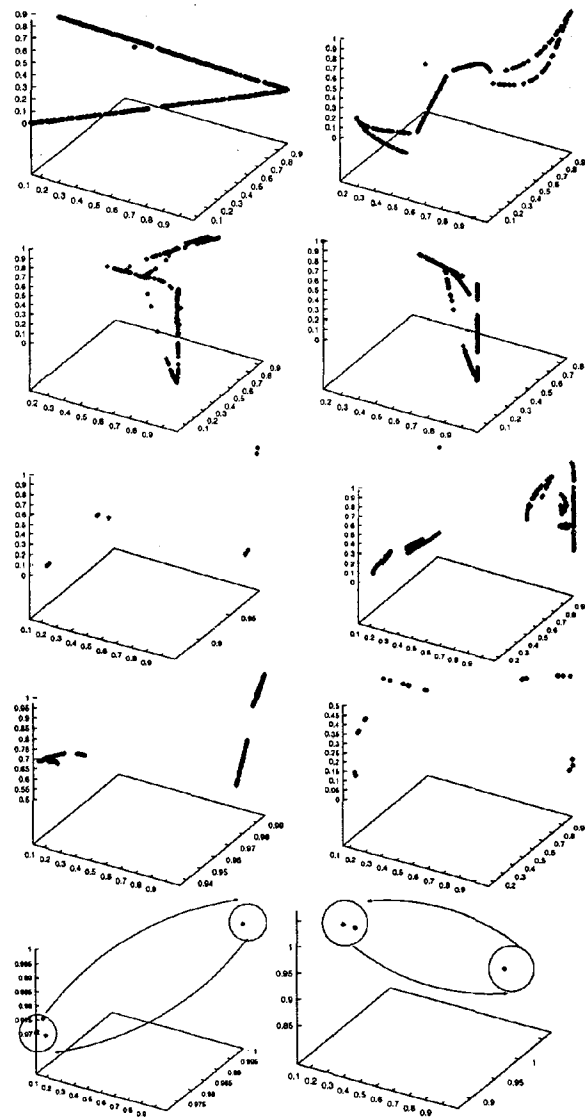


図 2: コンテキスト空間のパターンの時間的な変遷の様子。右はプレイヤー A の持つプレイヤー B のパターン。左は B の A のパターンである。最後はどちらも 2 ノードのオートマトン (TIT FOR TAT) に収束している。

FOR TAT だと信じ込む場合であることが分かる。ゲームの進行にしたがって段々にモデルは有限オートマトンへと収束し、最終的には TIT FOR TAT を形成する。一方で裏切りに至る場合には、単純な有限オートマトンになることを嫌い、無限ノードのオートマトンに対応するモデルを描きつつ遍歴することがみとれる。協調に至るプレイヤーたちが、TIT FOR TAT のモデルを構成できたのは、彼らがゲームにおいて、交互に C と D を出すというパターンを作れたからである。この振動パターンをある程度長くつくり出すことができれば、TIT FOR TAT のモデルを相手のモデルとして描くことができる。

すべての枝分かれを構成するのは無理なので、80ゲームまでに分岐したものを解析する。この時動的認識ネットワークに順番に番号をふって、どのモデルを最終的に持ち得たかをプロットしたのが、次の図4である。これを見ると相互裏切りに至る場合と、協調にいたる場合で明らかにモデルの収束点が異なり、相互裏切りを保つモデルの収束点は相対的に広いことが分かる。

5 ゲームのコンテキストの変更

ゲームのコンテキストの変更に伴って、可能世界の構造は異なる。次の図は、利得表の p と q を変えた場合に、どのように可能世界の枝振りが変わるか、またそのときどのくらい協調的なアトラクターが共存できるかを示してある。 p は相手からどのくらい搾取できるか、 q は裏切りあい陥った場合にある意味で損をする程度を表している。 q が大きいほど損はしない。

この表は特にまったくの裏切り状態からの可能世界の出現を描いている。わかることは p が大きいほど裏切りやすく、 q が大きいほど裏切りやすい。 q が 0.5 より大きいところでよく分岐する傾向があり、しかし p が大きいところの可能世界にはあまり協調的なアトラクターは含まれず、 p の小さいところに協調的なアトラクターはみつかるとなる。なぜ q の大きいところほど分岐するのかは不明だが、 p については納得できる結果である。ただしなぜ p が小さいところで分岐が多いかは必ずしも明白ではない。

分岐が頻繁に起こり、協調にいたる分岐が多い領域は、過去の履歴パターンに対して非常に敏感なところであるということが出来る。どの領域が複雑な可能世界構造を内包しているかということは、その過去の対戦履歴パターンに強く依存するが、ここで

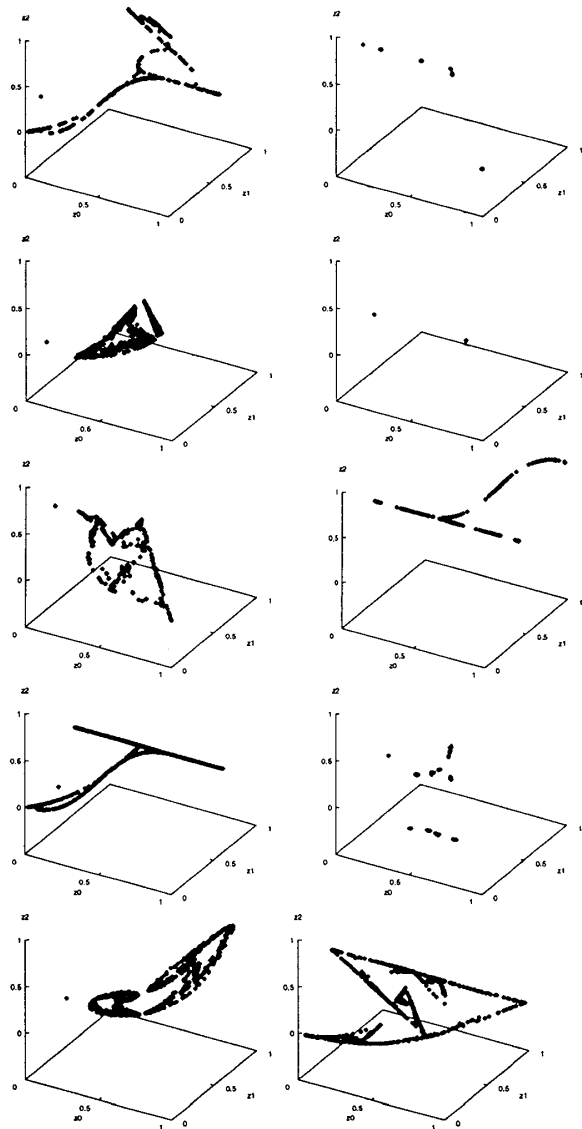


図 3: 10ゲーム回ごとに描いたそれぞれのプレイヤーがつくる相手のモデルのコンテキスト空間の形。

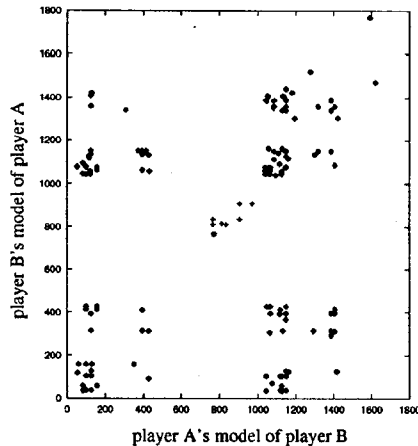


図 4: モデル空間の中で、各分岐で得られたモデルの組み合わせ。ここでクロスは協調に至った分岐を、ダイヤモンドは裏切りに至った分岐を描いてある。ゲームの利得表は $p = 1.7$ と $q = 0.5$ を用いている。

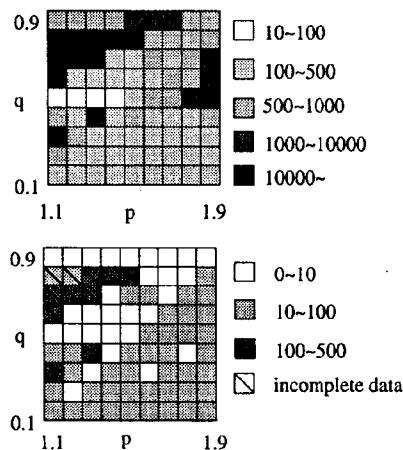


図 5: この相図は、相互裏切りパターンを初期値としたときの可能世界の構造を p と q の関数としてみたもの。(a) は総分岐数。(b) はそのうち相互裏切りに至らなかった分岐の数。ゲーム回数 60 までの分岐を計算している。暗いところほど、(a) ではより分岐をし、(b) ではより協調アトラクターが含まれていることを示している。(b) の斜線は分岐の総数が 10000 以上になったため、協調アトラクター分岐数の下限を表している。

みたように相互裏切り状態からの発展は意味がある。というのは、どの履歴パターンから出発したにせよ、相互協調か裏切りのアトラクターに吸い込まれていく。そのためその後可能世界の分岐がどのような構造をもつかは、相互協調からの分岐と相互裏切りからの分岐の構造で決まるからである。しかしどの (p, q) 領域で分岐が複雑になるか、あるいはそれが先読みの長さによって依存するかなどは現在解析中である。

Acknowledgements

この研究は、文部省科学研究費 (No. 09640454) の援助により行なわれた。

参考文献

- [1] R. Axelrod. *The Evolution of Cooperation*, (Basic Books, New York) 1984.
- [2] J. Elman, *Language as a Dynamical System in Mind as Motion* (eds. R.E. Port and T. van Gelder, MITpress 1995) pp.195-226.
- [3] G.E. Hughes and M.J. Cresswell, *An Introduction to Modal Logic* (Victoria Univ. press, 1968)
- [4] J. B. Pollack. The induction of dynamical recognizers. *Machine Learning*, 7:227-252, 1991.
- [5] M. Taiji and T. Ikegami, Dynamics of Internal Models in Game Players. (submitted to *Physica D* 1998).
- [6] T. Ikegami and M. Taiji, Structures of Possible Worlds in a Game of Players with Internal Models, *ACTA POLYTECHNICA SCANDINAVICA Ma 91* (1998) 283-292.